

# СОДЕРЖАНИЕ

Что в книге .....	7
1. Что внутри: от вещей к атомам.....	21
2. Что такое квант и что квантуется.....	31
3. Что враждует.....	43
4. Что еще из-за вражды .....	55
5. Что беспричинно .....	65
6. Что перестало устраивать Эйнштейна.....	77
7. Что от вращения .....	89
8. Что комбинируется и запутывается.....	101
9. Что толкает в будущее .....	115
10. Что с вероятностями, кошкой и коллапсом .....	127
11. Что за параллельные вселенные .....	139
12. Что значит поставить деньги .....	151
13. Что кричат лощманы .....	163
14. Что можно скрыть.....	175
15. Что отвечать на экзамене .....	189

16. Что же все-таки.....	201
17. Что телепортируется, но не клонируется.....	213
18. Что погибает, сообщив ответ.....	225
19. Что из игры в классики.....	237
20. Что раз в сто миллионов лет.....	249
21. Что портит память друзьям.....	261
22. Что от Дарвина.....	273
23. Что из моря.....	285
24. Что в поле.....	297
25. Что стандартно.....	309
Что в заключение.....	321
Уточнения и пояснения.....	323
Персонажи.....	361

Большинство из них даже не видят, в какую рискованную игру с реальностью они играют — с реальностью как чем-то, что не зависит от установленного.

*А. Эйнштейн* в письме к Э. Шрёдингеру (1950)

Несмотря на беспрецедентный эмпирический успех квантовой теории, само предположение, что она может быть *буквально верным описанием природы*, до сих пор встречается с глубоким недоверием, непониманием и даже гневом.

*Д. Дойч* (1996)

Почему квантовая физика меня интересует: именно потому, что она ломает ограничения наших обычных представлений о реальности. [И] она постоянно подвержена этой псевдоспиритуалистской опасности.

*С. Жижек* (2024)



# ЧТО В КНИГЕ

Квантовая механика — самое удивительное, что когда-либо было изобретено людьми: она дает лучшее возможное описание невидимых и даже непредставимых объектов, но оставляет не вполне понятным, каким образом это ей удастся.

Квантовая природа лежит в основе всего существующего, а знания о ней — в основе многих современных технологий. Каждый раз, когда нам удастся использовать в наших целях квантовые эффекты, они оказываются самым близким приближением к чудесам, какое вообще возможно без нарушения законов природы.

Согласно квантовым законам и только лишь благодаря квантовым законам существуют атомы, из которых состоим и мы сами, и почти все на планете Земля; благодаря квантовым законам горит Солнце; квантовые процессы определяют взаимодействие света и вещества; весь наш мир *собран* из квантовых объектов. Но фундаментальная квантовая природа в глубине мира остается в основном незаметной из-за мельтешения огромного числа мельчайших участников. По отдельности они ведут себя квантово и взаимодействуют друг с другом тоже по квантовым правилам, но все вместе образуют привычный нам наблюдаемый, и почти ничем не квантовый, мир. Будучи его обитателем, я не проваливаюсь сквозь пол, вижу свет, греюсь в лучах Солнца и вообще являюсь продуктом и воплощением сложной химии, не особенно задумываясь, что не-квантовые правила (законы классической физики) не в состоянии *ничего* из этого обеспечить! Парадоксальным обра-

зом привычные свойства окружающего мира основаны на чуждых ему квантовых явлениях.

Чуждых — потому что лежащие в основании мира квантовые объекты не являются «горошинами, только очень маленькими», и на пути от нас к ним происходит качественный переход, фундаментальным образом меняющий правила игры и вообще понятия:

На очень малом масштабе вещи ведут себя иначе — не похоже ни на что из вашего непосредственного опыта. Они не ведут себя как волны, они не ведут себя как частицы; они не ведут себя ни как облака, ни как бильярдные шары, ни как грузики на пружинах — ни как что бы то ни было из того, что вам приходилось видеть.

*Р. Фейнман\**

Свою главную задачу в этой книге я вижу в том, чтобы сконцентрироваться на квантовых принципах и на логике квантовой механики, по возможности не жертвуя при этом доступностью. *Принципы* определяют и характер изложения.

О дисциплине, в течение почти ста лет максимально успешно описывающей мир, можно наконец перестать рассказывать извинительно-индуктивно, «выводя» ее основные положения из нескольких характерных опытных фактов, организованных в условно-историческую последовательность. Вполне возможно вместо этого начать с заявления основных ее принципов — руководствуясь идеей, что, сколь бы необычными они ни казались, ста лет их повсеместного использования *достаточно* для их валидации и в дополнительных «оправданиях» никакой нужды нет. В индуктивном изложении квантовой механики, кстати, скачок при переходе от ранних экспериментов к развитому формализму все равно никуда не исчезает; историческая же канва, приводимая

---

\* Здесь и далее цитаты даны в переводе автора.

«для поддержки», часто оказывается искаженной ретроспективным взглядом именно с высоты осознанных позднее принципов, что и историю лишает историчности, и принципы разбавляет конкретикой частных случаев.

Поэтому в этой книге нет ничего от учебника, от «краткого курса» физики. Равным образом не следует искать тут исторического изложения развития квантовой теории, хотя кое-какие отсылки к прошлому, разумеется, присутствуют, в том числе в привязке к некоторым фамилиям. (И еще я стараюсь избегать избытка терминов, главным образом из опасения, что, один раз выпустив их на свободу, я не выдержу искушения и буду прятать за ними неполноту понимания и объяснений.) Зато в центре находятся главные положения квантовой механики и логические следствия из них, а также основные *недосказанности* квантовой механики. Эти последние определяются тем, что формальной (и на удивление хорошо работающей) схеме недостает привязки к физическим реалиям. Такое положение дел вызывает к жизни *интерпретации* — в широком смысле слова, попытки дополнить формальную схему квантовой механики более «смысловым», физическим содержанием. Развиваемые при этом рассуждения, как выясняется, доходят до вопросов о структуре реальности — приобретая тем самым даже *философское* измерение.

«Обычные» физические теории описывают какие-то конкретные аспекты физического мира, тогда как философские концепции оперируют более общими понятиями и в целом ведут независимое существование. Квантовая же механика уникальна сочетанием по крайней мере трех факторов: она, во-первых, дает количественное описание, во-вторых, имеет универсальную применимость и, в-третьих, затрагивает философские вопросы об устройстве реальности. Я хочу кратко прокомментировать каждое из этих положений.

*Количественное описание.* Квантовая теория с колоссальным отрывом лидирует среди всех областей человеческого знания по достигну-

той точности совпадения теоретического результата и экспериментальных данных. Свойства электрона включают величину, которую можно (ценой *значительных* усилий) с высокой точностью вычислить теоретически, а кроме того (да, при большом старании), с высокой же точностью измерить в опыте. Эти две ничем не схожие стратегии действий дают фантастически близкие результаты (совпадают 12 значащих цифр):

вычислено = 1,00115965218161(24),

измерено = 1,00115965218059(13)

(в скобках указан размер неточности в двух последних знаках). Результат вычисления опирается на «всё», что есть в квантовой теории<sup>1</sup>, и, вне всякого сомнения, свидетельствует, что имеющаяся теория не может быть радикально неправильной, если выразаться самым сдержанным образом.

*Универсальная применимость.* Основные правила квантового мира представляют собой фундаментальные законы природы. С каким охватом и насколько фундаментальные? До какой степени мы в них уверены?

Ни одна физическая концепция не является «сакральным» знанием, и мы в целом готовы к тому, что при *каких-то* условиях концепции могут отказывать. основополагающие принципы физики нельзя *доказать* в математическом смысле — они выражают собой обобщение наблюдений и не предполагают «доказательства»; опровергнуть же их, наоборот, можно даже единственным ясно выраженным контрпримером. В общем, мы пользуемся физическими теориями до тех пор, пока они соответствуют наблюдениям, а когда это перестает происходить, задумываемся о новых.

На фоне всех известных нам научных концепций квантовая механика дополнительно выделяется необычностью своего устройства. И тем не менее ни из одного угла Вселенной не поступает указаний, что базовые квантовые принципы требуют пересмотра.

Вот характерное высказывание по этому поводу (заодно затрагивающее и следующую важную тему, правда, с использованием устрашающей терминологии):

Вполне возможно, что в один прекрасный день мы обнаружим расхождения квантовой теории с экспериментами. Однако данные на сегодняшний день подтверждают тот взгляд, что наша Вселенная является квантовой до самой сердцевины, и поэтому нам необходимо согласовать принцип суперпозиции, унитарность и их последствия — иллюстрируемые, например, нарушением неравенства Белла — с нашим восприятием и пониманием.

*В. Зурек*

*Устройство реальности: интерпретации.* «Восприятие и понимание» в приведенной цитате — это о том, как, собственно, устроена квантовая реальность и наши взаимоотношения с ней, при том что мир вокруг нас совсем не выглядит квантовым. Выяснить это непросто: квантовая реальность прячется за сложением эффектов, происходящих от огромного числа объектов, а непосредственно «подглядеть» за ними поодиночке очень непросто уже по той причине, что квантовые объекты вообще *никак не выглядят*. Достигнутые успехи в понимании квантовой природы потребовали мышления с опорой не на наглядность, а на логику, вовлекающую математические абстракции. Но при этом в известной мере стирается грань между самими объектами и языком, на котором мы их обсуждаем. Не так просто разграничить три типа «вещей»: квантовую теорию как формально-математическую схему (необычайно успешную, как уже было сказано), квантовый мир «сам по себе» (ускользающий от прямого рассмотрения) и результаты измерений, которые мы получаем, изучая квантовые системы.

Недоговоренности по поводу того, «что есть что» в мире и в наших представлениях о нем, ничуть не мешают успехам

квантовой механики, но только усиливают желание предложить *интерпретации* — основанные на некоторых дополнительных предположениях пояснения о том, «что все-таки происходит», *что* именно описывает квантовая теория и как *оно* связано с наблюдаемой структурой мира. В подавляющем большинстве традиционных руководств по квантовой механике вопросы различных интерпретаций практически не обсуждаются как слишком философские, да и не нужные для вычислений, но здесь им будет уделено должное внимание. Интерес к ним, надо сказать, составляет тенденцию последнего времени, отмеченную среди прочего недавней Нобелевской премией по физике и подпитываемую перспективой квантовых вычислений и расширяющимися экспериментальными возможностями.

**Что же в книге?** Разбиение на главы отражает содержательную часть, а не исторические вехи, как уже было сказано. Вот подсказки для нетерпеливых. Самые «веселые» (в значении, близком к «беззаботные») главы — 11 и 12; самые «практичные» (при общем отсутствии акцента на практических аспектах) — 17 и 18; самые сложные — 24 и 25; самая загадочная — 21; основные в отношении базисного содержания квантовой механики — 8, 9 и 10; самые «исторические» (при общем отсутствии акцента на исторических аспектах) — 6, 14 и 23. Про не упомянутые здесь главы нельзя сказать, что у них нет никаких качеств, просто не видно какого-то одного заведомо доминирующего. Для тех, кто не собирается читать по порядку, но сначала все же наткнулся на этот абзац, вот кратчайшее описание содержания.

Вслед за вводной главой 1 главные качественные особенности квантового мира обсуждаются в главах 2–5. Основные мотивы здесь — возникновение дискретности (глава 2), несовместимость различных свойств друг с другом (которую я называю враждой, чтобы избежать технически очень нагруженного высказывания; главы 3 и 4) и индетерминизм (глава 5). Промежуточный итог

в некотором роде подводится в главе 6, отчасти с критических позиций, которые в свое время отстаивал Эйнштейн. Он руководствовался определенными представлениями об устройстве реальности, и в книге эти вопросы также появляются в этой главе. До некоторой степени техническое, но совершенно необходимое для всего дальнейшего «отступление» в главе 7 посвящено спину.

В главах 8 и 9 появляется основное средство для описания *состояний* квантовых систем — фундаментальное эволюционное уравнение, к которому «сама тянется рука» каждого профессионала перед лицом едва ли не любой квантовой задачи. Вооружившись этим знанием, в главе 10 мы на новом уровне возвращаемся к индетерминизму, а конкретно к вероятностям.

С этого момента становятся видны основные «недоговоренности» квантовой механики. Они представляют собой определенный вызов, и значительная часть книги (главы 11, 12, 13, 19, 20) посвящена вариантам ответа на него — интерпретациям квантовой механики. Они кажутся мне интересными не только каждая сама по себе, но еще и тем, насколько они непохожи. Мы *пока* не в состоянии эмпирически обосновать выбор между ними, но прогресс в технологиях уже позволил получить от природы ответ на конкретный вопрос о том, как в квантовой реальности (не) могут присутствовать скрытые параметры — «еще более глубокий» слой реальности. Эта история, начало которой восходит к сомнениям Эйнштейна, а кульминация на данный момент отмечена Нобелевской премией 2022 года, излагается в главах 14, 15, 16. Здесь не обошлось без некоторой исторической канвы, а на первом плане оказалась квантовая запутанность.

Возможности квантовой механики в действии иллюстрируются на примере квантовой телепортации (глава 17) и квантовых вычислений (глава 18). Комбинация нескольких концепций в главе 21 позволяет заострить и уточнить вопросы об устрой-

стве квантовой реальности. Столь важная для нас метаморфоза — «превращение» квантового мира внутри вещей в окружающий нас классический мир — обсуждается в главе 22.

Завершающие главы 23, 24, 25 — это переход от квантовой механики к релятивистской квантовой теории поля, начинающийся с бессмертной саги с Дираком в главной роли. Впрочем, кульминационную в этом сюжете главу 24 придется, возможно, пропустить из-за заметного превышения допустимого уровня абстракции (я надеюсь, что читатель великодушно простит мне «выпадение» около 4% общего объема книги). Для «валидации» всей конструкции квантовых полей в глазах тех читателей, у кого она вызвала легкую оторопь, в главе 25 появляется Стандартная модель. Путеводитель по этой фундаментальной теории там искать не следует, но мне кажется важным в завершение книги добраться до самой квантовой «сердцевины».

В конце для справки приведены кратчайшие биографические сведения о почти всех упоминаемых в книге людях.

Если в этой книге есть сквозная тема, то это *запутанность*. Это существенно квантовое явление когда-то воспринималось как экзотика, но сейчас играет все более определяющую роль в нашем понимании того, как функционирует квантовый мир, одновременно находя применение в такой практической области, как тайнопись. Запутанность не сконцентрирована в какой-то одной главе, поэтому может оказаться полезным отдельный краткий путеводитель по тем местам, где она встречается.

Впервые запутанность упоминается в главе 6. Вообще-то она представляет собой свойство волновой функции, с которой мы знакомимся только в главе 8, и там, с учетом приобретенного знания, она обсуждается с использованием метафоры «квантового казино» (которая по существу является слегка замаскированной формой абстрактного математического определения).

Запутанность, которая в согласии с фундаментальными правилами должна бы наблюдаться, но не наблюдается («практические» кошки не запутываются по Шрёдингеру), — предмет беспокойства и обсуждения начиная с главы 10. Разрешение противоречия, обсуждаемое в главе 11, основано на идее, что запутанности в мире не меньше, а больше, чем представляется: запутываются в том числе хозяева и хозяйки кошек, из-за чего их «копии» расходятся по различным вселенным. В главах 15 и 16 запутанность возникает во всей полноте как средство задавать природе тонкие вопросы о том, когда и как квантовые объекты приобретают свои свойства. В главе 17 запутанность — главная идея, потому что на ней и основана квантовая телепортация. В полной мере работает запутанность и в главе 18, где без нее от квантовых вычислений не осталось бы практически ничего. В главе 20 именно запутанность приводит к немедленному распространению локализации с одного электрона «на всю кошку». В главе 21 она играет не последнюю роль в знаменитом конфликте восприятий, намекающем на «конфликтную» структуру квантовой реальности, а в главе 22 она же делает все возможное, чтобы конфликты замаскировать и создать у всех нас иллюзию гладкой классической реальности.

Для некоторых читателей может оказаться полезным и еще один взгляд на часть содержания: с точки зрения уже упомянутых интерпретаций квантовой механики. *Вообще* их известно немало, поэтому неизбежен отбор. Вот что получилось:

(0) «Копенгагенское» (лучше: стандартное) понимание растворено в начальных главах и «дооформляется» в главе 10. (1) Из твердого следования логике уравнения Шрёдингера и полного доверия волновой функции как адекватному отображению мира вырастает многомировая интерпретация, обсуждаемая в главе 11. (2) В резком контрасте с ней — героический кьюбизм из главы 12, где волновая функция, а заодно и многое другое, оказывается всего лишь содержимым вашей головы.

(3) Классике жанра — квантовой механике де Бройля — Бома — посвящена глава 13; уроки в отношении скрытых параметров и нелокальности (извлеченные не сразу, но послужившие триггером для важного дальнейшего развития) обсуждаются в главе 14. (4) Последовательные/основательные истории в главе 19 — это «копенгаген с человеческим лицом» в виде набора правил для любого рассказчика историй «из жизни квантовых объектов»; соблюдение их избавляет от противоречий внутри сюжета, но сюжетов получается столько же, сколько рассказчиков. (5) А в главе 20 постулируется механизм, который, возможно, недопридуман в «копенгагене», — самопроизвольная локализация волновой функции как физический процесс; это, строго говоря, уже не совсем интерпретация квантовой механики, а, скорее, ее развитие в другую теорию. Объять необъятное невозможно: здесь совсем не обсуждаются относительные состояния и модальные интерпретации и лишь едва упомянут супердетерминизм.

Любая форма — это ограничение. Во-первых, объем книги решительно не позволил затронуть даже теоретические аспекты квантовых явлений в веществе и квантовой оптики, не говоря уже о захватывающих экспериментальных подробностях. Эти обширнейшие области, развивающиеся самым активным образом и, собственно, производящие те самые «чудеса без нарушения законов природы», представляют собой все выразительнее звучащую симфонию квантовой теории; на них приходится львиная доля всех ее приложений. Сюда относится, строго говоря, вся электроника, а также фотоника, практическая квантовая криптография и многое другое. Одни только названия разнообразных эффектов звучат сверхзавлекательно (например, «кристаллы времени», «квантовое обращение времени», «топологические изоляторы», «квантовый эффект Зенона», «квантовые радары»). Каждый из них заслуживает отдельного эссе, а поскольку время от времени появляются не менее завлекательные новые эффекты, эта книга никогда не была бы закончена; да и вообще это темы для другой,

куда менее «философской» книги. Я рассчитываю, однако, что их растущая актуальность разбудит и более «философский» интерес к тому, что лежит в основе как всех практических приложений квантовой теории, так и определяемых ею фундаментальных аспектов мироустройства.

Во-вторых, я полностью отдаю себе отчет, что и по поводу любого из затронутых в книге вопросов можно высказаться точнее и глубже, да и вообще сказать больше, в том числе добавив (иногда и правда занятные) исторические подробности. Если читатель захочет обратиться к другим источникам, чтобы в этом убедиться, моя задача будет выполнена.

Еще, пожалуй, стоит с достаточной определенностью высказаться по поводу недосказанностей квантовой механики, которые я здесь подробно обсуждаю. Самое несуразное, что можно заключить из их наличия, — это что существующая квантовая теория представляет собой конгломерат произвольных заявлений, каждое из которых можно по желанию заменить на какое-то другое. Ничего подобного. Математическая схема квантовой механики последовательна и лишена внутренних противоречий; она позволяет получать численные предсказания, которые подтверждаются опытными фактами. *Необходимости* в каких бы то ни было изменениях фундаментальных квантовых идей замечено не было, никаких указаний на это ниоткуда не поступает. *Возможности* их дополнения, как и их интерпретации в привычных нам терминах, обсуждаются, однако и они, при всем имеющемся разнообразии, далеки от «произвольных», и несколько конкурирующих идей сосуществуют тут до тех пор, пока это, опять же, позволяют логическая последовательность и согласие с опытом<sup>2</sup>.

Попутно я бы предостерег от поверхностных аналогий и параллелей между квантовой механикой и далекими от нее областями. Прекрасно, если *методы* квантовой механики применимы где-то еще. Квантовая механика, однако, — это вполне конкретная схема, работающая по ясным правилам, и аналогия между

каким-то ее аспектом и явлением из другой сферы не означает, что эта последняя имеет в каком бы то ни было смысле квантовую природу. Да, настойчивый вопрос «Как ты ко мне относишься?» влияет на человеческие отношения вопрошающей и ответствующей сторон, и это обстоятельство может даже служить *метафорой* того факта из квантовой теории, что любое наблюдение представляет собой воздействие, — но не более чем метафорой. Кстати, в книге о квантовой механике без формул какие-то сравнения и метафоры неизбежны, и я прошу читателя не забывать, что любая метафора — не модель явления. Она в лучшем случае передает какую-то часть картины, а потому даже в качестве иллюстрации имеет ограниченное применение. После всех этих предупреждений можно наконец двинуться вперед!

**Благодарности.** Я благодарен многим, кто (в силу самых разнообразных причин и поводов) разными способами, в основном задавая вопросы или заставляя меня отвечать на незаданные вопросы, побуждал меня думать о том, что в итоге оказалось написанным, или/и о том, что я вычеркнул в последний момент. Среди прочих это Екатерина Абросимова, Михаил Аркадьев, Максим Гревцев, Александр Жаданов, Григорий Ковбасюк, Валентина Овчинникова, Алексей Сивухин, Руслан Смелянский, Янина Хужина, Алексей Шилов. Я также благодарю всех своих слушателей в разных аудиториях за внимание и вопросы, как и всех тех, кто при незапланированных встречах высказывал мне поддержку. В процессе написания мне сильно помогли критические отзывы об отдельных главах, которые я получал от Ирины Гарт, Андрея Когуня, Валентины Овчинниковой, Марии Попцовой, Ксении Семихатовой, Николая Семихатова, Аркадия Цейтлина, Олега Шейнкмана.

Лучшая шутка из всех, что я слышал за последние полгода (уж во всяком случае среди шуток в мой адрес), принадлежит Андрею Когуню: что я являюсь автором *локализации* терминов

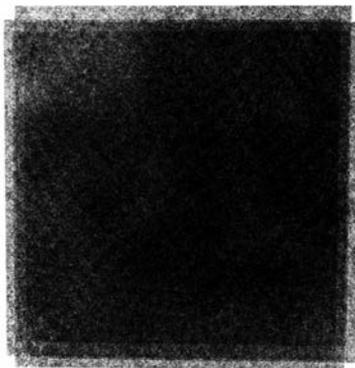
*Alice* и *Vob*. Эта история тянется с моей предыдущей книги\*, но «Аня» и «Яша» фигурируют и здесь тоже; пожалуй, я в немалой степени сроднился с ними, и мне приятно, что наше сотрудничество продолжается. И не только с ними. Неисчерпаемый потенциал помощи со стороны этих двух ассистентов в проведении мысленных экспериментов далеко превзойден тем вкладом, который внес в эту книгу ее редактор Петр Фаворов. Сделанные им многочисленные разноуровневые улучшения касаются и способа выражения, и смыслов, и все вместе с необычайной точностью способствуют поддержанию того духа книги, который я с самого начала хотел воплотить, но сталкивался с нехваткой выразительных средств. Неблагодарный труд научного редактирования взял на себя Алексей Цвелик; я обязан ему рядом поправок и несколькими очень точными дополнениями, сделанными согласно его предложениям там, где мое знание как раз заканчивалось; моей возросшей верой в себя благодаря его отклику на мои усилия и одновременно осознанием скромности этих усилий перед лицом неисчерпаемости такой темы, как *понимание* квантовой механики. Я благодарю Павла Подкосова и издательство «Альпина нон-фикшн» за смелое решение издать вторую мою книгу в течение двух лет — и до сих не знаю, подстроило ли издательство мою случайную встречу с Нюсей Красовицкой в дождливый осенний день на одном из мероприятий, куда я пришел по их просьбе. Эта встреча экспоненциально быстро превратилась в ее чудесное решение взяться за иллюстрации к этой книге, невзирая на мои уверения, что сам предмет начисто лишен наглядного представления. Последовавшие затем отчаянные обсуждения несуществующих

---

\* Семихатов А. Всё, что движется: Прогулки по беспокойной Вселенной. От космических орбит до квантовых полей. — М.: Альпина нон-фикшн, 2023, ISBN 978-5-00139-749-6. Я пользуюсь случаем поблагодарить читателей за внимание, вопросы и присланные исправления; на глупую оплошность в формулировке закона Кеплера в первом тираже раньше всех мне указал Сергей Мамон, а небольшую «прогулку по опечаткам» предпринял Ян Партс.

образов должны были причинять ей нескончаемые мучения, а меня заставляли высказываться более емко и определенно, что в итоге нашло свое отражение и в тексте; поэтому получилось так, что иллюстрации в этой книге — больше, чем просто визуальные метафоры. Вот и первая — приглашающая читателя к необычному.

Квантовые объекты  
вообще никак  
не выглядят.



Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)